

УДК 523.947+523.982-357

## Корональное магнитное поле в переходной области хромосфера-корона над солнечными пятнами по наблюдениям на микроволнах: возможности и проблемы исследований

*Н.Г. Петерова<sup>1</sup>, Н.А. Топчило<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> СПбФ САО РАН, Санкт-Петербург, Россия  
*peterova@yandex.ru*

<sup>2</sup> НИАИ СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия  
*topchilona@yandex.ru*

Поступила в редакцию 31 октября 2013 г.

**Аннотация.** Спектрально-поляризационные наблюдения Солнца в диапазоне радиоволн, как известно, дают возможность исследовать корональное магнитное поле (КМП) в большом интервале высот от уровня фотосферы до расстояний  $\sim 100$  тыс. км, в настоящее время – с детальностью  $\sim 100$  км. Используя теорию солнечного радиоизлучения, развито несколько методов для изучения как сильных полей (2–3) КГс (переходная область хромосфера-корона), так и слабых (10–100) Гс (флоккульные уярчения, источники типа “галло”, протуберанцы). Приведены результаты исследований переходной области на примере активной области NOAA 11140 (январь 2011 г.). Оказалось, что результаты наблюдений во всем диапазоне микроволнового излучения (2–13) см не удается объяснить в рамках единой модели КМП и нужно использовать различные модели для нижней и верхней короны. Для адекватной интерпретации наблюдений предлагается сочетать модель соленоида (короткие волны) и диполь (длинные волны). Произведены расчеты и определена область применимости обеих моделей.

CORONAL MAGNETIC FIELD IN THE TRANSITION REGION FROM THE CHROMOSPHERE TO CORONA ABOVE SUNSPOTS ON MICROWAVE OBSERVATIONS: POSSIBILITIES OF RESEARCHES AND PROBLEMS, *by N.G. Peterova, N.A. Topchilo*. Spectral and polarization observations of the Sun in radio waves, as we know, give the possibility to investigate the coronal magnetic field (CMF) in a wide interval of heights from the photosphere level to distances  $\sim 100$  thousand km, now – in detail  $\sim 100$  km. Using the theory of solar radio emission, some methods for studying both strong fields (2–3) KGs (transition region from the chromosphere to corona), and weak (10–100) Gs (plage brightnings, “halo” like sources, prominences) are developed. The results of investigation of the chromosphere-corona transition region above the main sunspot of NOAA 11140 (January, 2011) are given. It turned out that results of observations over the entire range of microwave radiation (2–13) cm can’t be explained within a unified model of the CMF and there is need to use different models for the bottom and top corona. For an adequate interpretation of the observations we proposed to combine a solenoid model (short wave) with a dipole one (long wave). Some calculations are made and the area of applicability of both models is defined.

**Ключевые слова:** Солнце: солнечные пятна; Солнце: корона, магнитные поля

---

## 1 Введение

Спектрально-поляризационные радионаблюдения источников циклотронного излучения (ИЦИ), как известно (Железняков, 1962, 1963), дают возможность исследовать корональное магнитное поле (КМП) над солнечными пятнами. Согласно теории, спектр циклотронного излучения носит линейчатый характер и на любой фиксированной частоте  $f$  предоставляется возможность определить параметры излучения источника, соответствующего магнитному полю  $H(f)$ . В дипольной модели КМП, ИЦИ над солнечным пятном на частоте  $f$  имеет вид очень тонкой (несколько км толщиной) полусферы (гируровень), для которого можно измерить спектральную плотность излучения и оценить яркостную температуру, а также степень поляризации. Детальность исследования КМП в переходной области хромосфера-корона над пятном определяется величиной пространственного и частотного разрешения наблюдений. В настоящее время для наблюдений Солнца с помощью радиотелескопа РАТАН-600 достигнуто частотное разрешение  $\sim 1\%$  (Богод и др., 2011), что позволяет исследовать КМП в области нижней короны с детальностью по высоте над уровнем фотосферы  $\sim 100$  км (Коржавин и др., 2010).

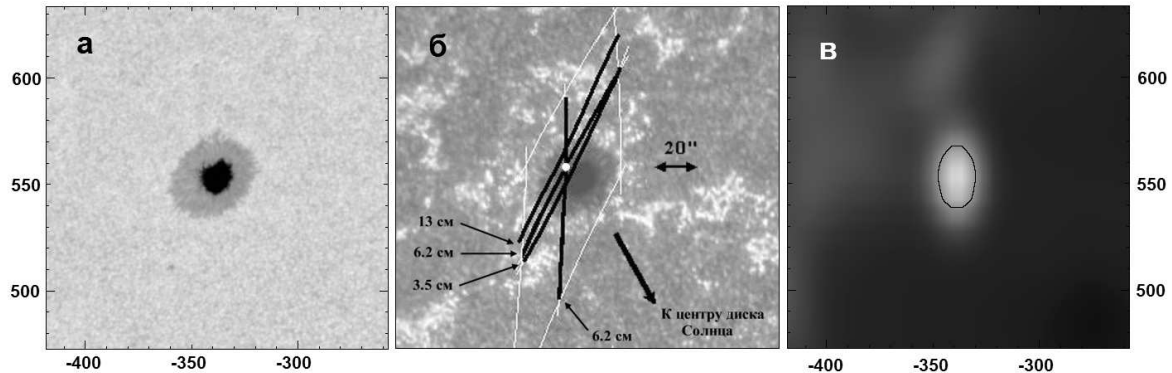
Для уточнения представлений о характере КМП над солнечными пятнами, которые еще нельзя считать твердо установленными, кроме высокого частотного разрешения необходимо также высокое пространственное разрешение наблюдений. Для лучших радиотелескопов, ведущих регулярные наблюдения Солнца (NoRH, ССРТ, РАТАН-600), оно ограничено значениями (12–20) угл. сек. Этого недостаточно для исследования пространственной структуры изображения ИЦИ, ибо размер тени среднестатистического пятна сравним с указанной выше величиной и составляет  $\sim 20$  угл. сек. В этой ситуации помогают эпизодические наблюдения, выполняемые на интерферометрах, таких как VLA и WSRN, а также наблюдения во время солнечных затмений, выполняемые даже на малых зеркалах.

В настоящей работе мы исследуем КМП над солнечным пятном активной области NOAA 11140, наблюдавшимся во время солнечного затмения 04.01.2011 г., с рекордным пространственным разрешением  $\sim 1$  угл. сек., близким к дифракционному пределу (Финкельштейн и др., 2012). Это позволяет получить высокоточные значения размеров ИЦИ и координат центра тяжести его излучения. Задачей исследования является сопоставление наблюдательных данных с моделью ИЦИ и поиск причин расхождений между ними – прежде всего возможных отличий характера реального КМП от модели точечного диполя.

## 2 Пятно активной области NOAA 11140 и его наблюдения

Морфология и динамика пятна в АО 11140 были исключительно благоприятны для решения поставленной задачи – тень пятна имела правильную форму (см. фотогелиограмму на рис. 1, левый кадр), которая практически не менялась в течение длительного времени (2 оборота, декабрь 2010 г. и январь 2011 г.). В исследовании использовались результаты наблюдений во время солнечного затмения 04.01.2011 г., выполненные с помощью радиотелескопа РТ-32 на трех фиксированных частотах 3.5 см – 6.2 см – 13 см в обсерватории Светлое (Финкельштейн и др., 2012), а также результаты внезатменных наблюдений АО 11140 (карты) на волне 1.76 см с помощью радиогелиографа NoRH, взятые на <http://solar.nro.nao.ac.jp/norh/archive.html>. Дополнительные данные наблюдений этой АО в других диапазонах электромагнитного излучения (оптика, УФ) брались из архива SDO на сайте JSOC (<http://jsoc.stanford.edu/>). Рисунок 1 иллюстрирует результаты затменных наблюдений, наложенных на изображение пятна в линии 1700 Å (SDO/AIA), и наблюдений NoRH.

Используя указанные наблюдения, были оценены размеры ИЦИ (см. табл. 1), а также значение высоты области излучения над фотосферой по смещению центра тяжести излучения ИЦИ (см. рис. 1, средний кадр) относительно геометрического центра тени пятна. Для пятна АО 11140, расположенного в день затмения в N-E полушарии Солнца, отмечается ожидаемая зависимость координаты ИЦИ от длины волны, если считать, что высота области излучения растет с ростом длины волны. Для ИЦИ на волне 3.5 см эта высота не может превышать значения  $\sim 5$  тыс. км, если максимальное значение МП достигается в геометрическом центре тени пятна.



**Рис. 1.** (а) Фотогелиограмма основного пятна АО 11140 (слева), (б) положение лунного лимба в моменты контактов с ИЦИ над пятном по наблюдениям на 6.2 см (белые линии) и положение максимумов излучения на всех трех волнах, (в) вид ИЦИ (параметр I) по наблюдениям на NoRH (справа). Темная изолиния указывает уровень, соответствующий  $0.5 I_{max}$

**Таблица 1.**

Инструмент	NoRH	Затмение	
Длина волны	1.76 см	3.5 см	6.2 см 13.0 см
E-W размер ИЦИ	19''	20''	30'' 40''

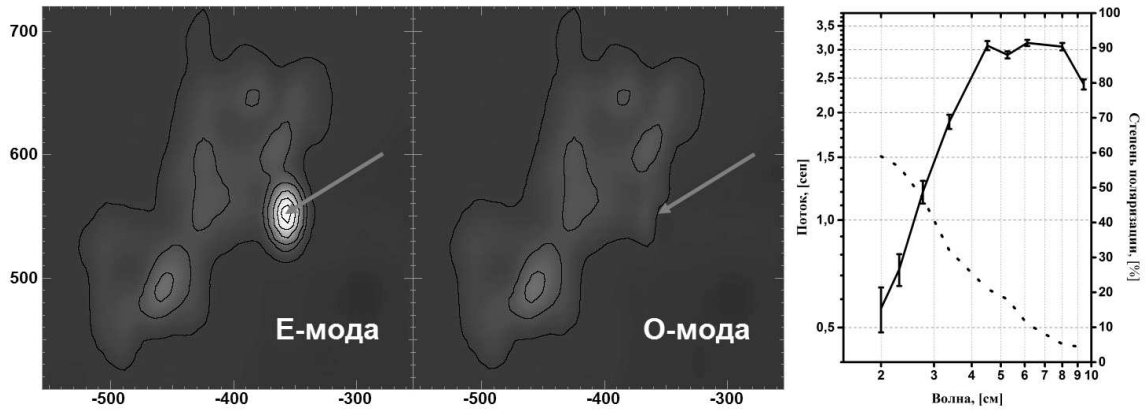
### 3 Обсуждение результатов наблюдений

Природа микроволнового излучения источника, расположенного над пятном АО 11140, не вызывает сомнения. Согласно спектрально-поляризационным наблюдениям с помощью радиотелескопа РАТАН-600 (Коржавин и др., 2012), это был источник циклотронного излучения тепловой плазмы в сильном КМП пятна. Спектр потоков имел максимум в диапазоне (4–8) см и высокую степень поляризации, на коротких волнах близкую к 100 % (рис. 2).

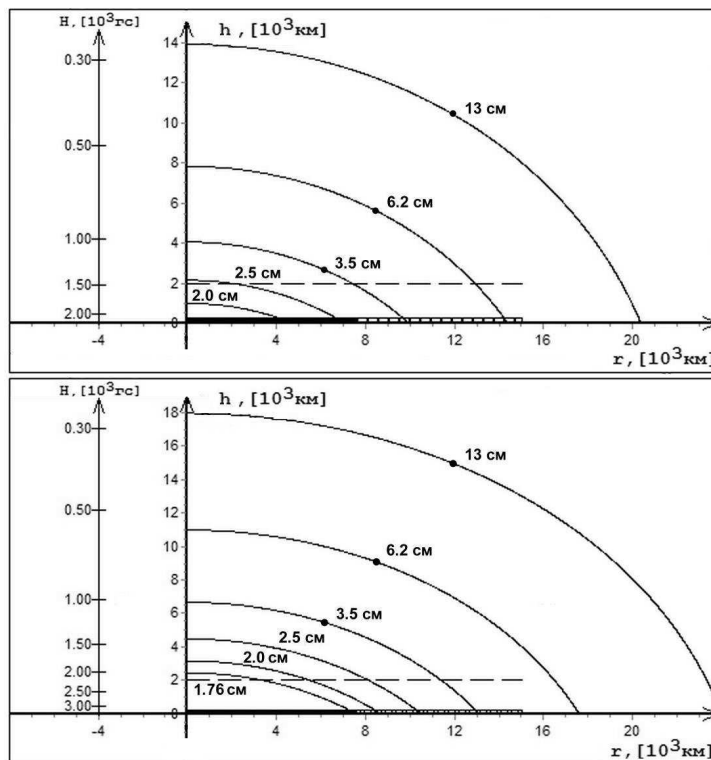
Это позволяет интерпретировать результаты наблюдений в рамках модели, согласно которой излучение ИЦИ генерируется вторым (о-мода) и третьим (е-мода) gyroуровнями. На рис. 3 (верхний рисунок) представлена модель ИЦИ, рассчитанная для величины магнитного поля в центре пятна на уровне фотосферы  $H_{spot} = 2100$  Гс (использованы результаты измерений МП на SDO/HMI), в предположении, что КМП описывается моделью точечного диполя. Показан 3-й gyroуровень на фиксированных частотах, на некоторых из них (точки) нанесены размеры ИЦИ по наблюдениям затмения. Пунктиром обозначен уровень холодной плазмы (средняя хромосфера).

На первый взгляд результаты затменных наблюдений удовлетворительно согласуются с принятой моделью. Однако при этом оказывается, что на более коротких волнах ИЦИ не должен наблюдаться, ибо он находится в холодной области. В действительности же, согласно наблюдениям на радиогелиографе NoRH и на радиотелескопе РАТАН-600 на волнах (1.76–2.00 см), наблюдается яркий сильнополяризованный ИЦИ (см. рис. 2). Причем наблюдаемые размеры ИЦИ в этом диапазоне достаточно велики (табл. 1.), что также входит в резкое противоречие с моделью.

В этой ситуации единственный способ согласования модели с радиоданными состоит в значительном увеличении величины фотосферного магнитного поля. Определенное основание этому имеется. Так, измерения магнитных полей в сети GONG регулярно превышают значения, измеряемые на SDO, и ранее – на SOHO. На день затмения среднее значение по станции сети GONG составило 3300 Гс. Дипольная модель для этого значения МП приведена на рис. 3 (нижний рисунок). Этот



**Рис. 2.** Карты активной области АО 11140 на 04.01.2011 по наблюдениям NoRH (слева) и спектры излучения ИЦИ над основным пятном (справа) по наблюдениям РАТАН-600. Сплошная линия на графике — спектральная плотность потока излучения, пунктирная — степень поляризации. Стрелками на картах указано положение пятна

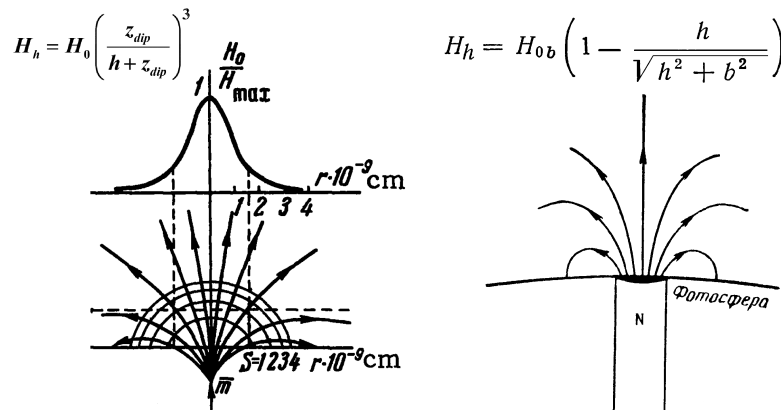


**Рис. 3.** Модель ИЦИ над пятном АО 11140 в предположении о дипольном характере КМП (диполь точечный) для полей с различной максимальной напряженностью на фотосфере (2100 Гс для верхнего рисунка, 3300 Гс для нижнего)

вариант модели явно лучше соответствует результатам затмения, однако на самых коротких волнах измеренный размер ИЦИ все еще заметно больше модельного.

Интерпретация спектрально-поляризационных наблюдений в рамках дипольной модели КМП пятен и ранее неоднократно сталкивалась с разного рода трудностями. К примеру, при исследовании спектра яркостных температур отдельно для о- и е-мод излучения оказывалось (Топчило и др., 2010), что на коротких волнах (короче 2 см) о-мода горячее, чем е-мода. Обычно считается, что о-мода генерируется 2-м gyroуровнем, расположенным в более холодной части нижней короны по сравнению с 3-им gyroуровнем, ответственным за излучение в е-мод. Совокупность такого рода невязок приводит к мысли, что КМП пятен в большом диапазоне высот (от фотосферы до высот  $\sim 20$  тыс. км и более) следует представлять в виде более сложной модели, чем это допускает модель точечного диполя.

В поисках способа модифицировать модель КМП мы основывались на тех фактах, согласно которым основные проблемы связаны с интерпретацией коротковолновой части спектра ИЦИ. Очевидно, что в нижней короне КМП должно расходиться с высотой медленнее, чем на больших высотах при удалении от уровня фотосферы. И потому кажется, что на малых высотах предпочтительнее модель соленоида (см. формулы, приведенные на рис. 4).

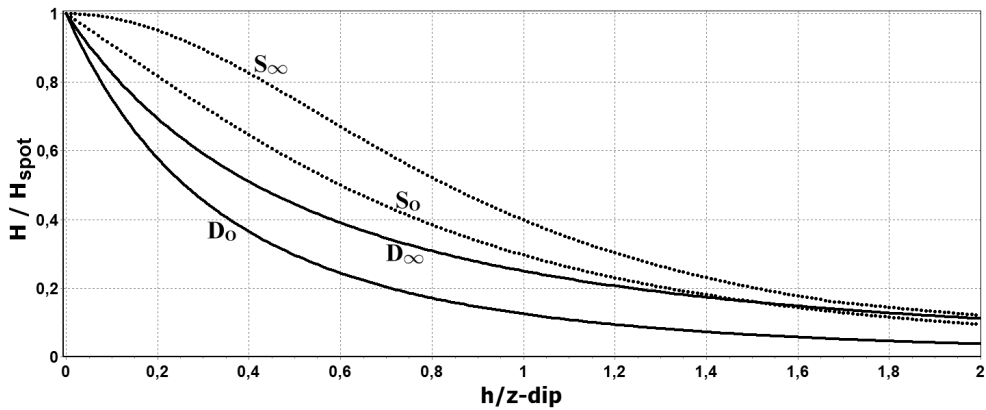


**Рис. 4.** Модель точечного диполя (Злотник, 1968) (слева) и полубесконечного соленоида (Железняков, 1964) (справа)

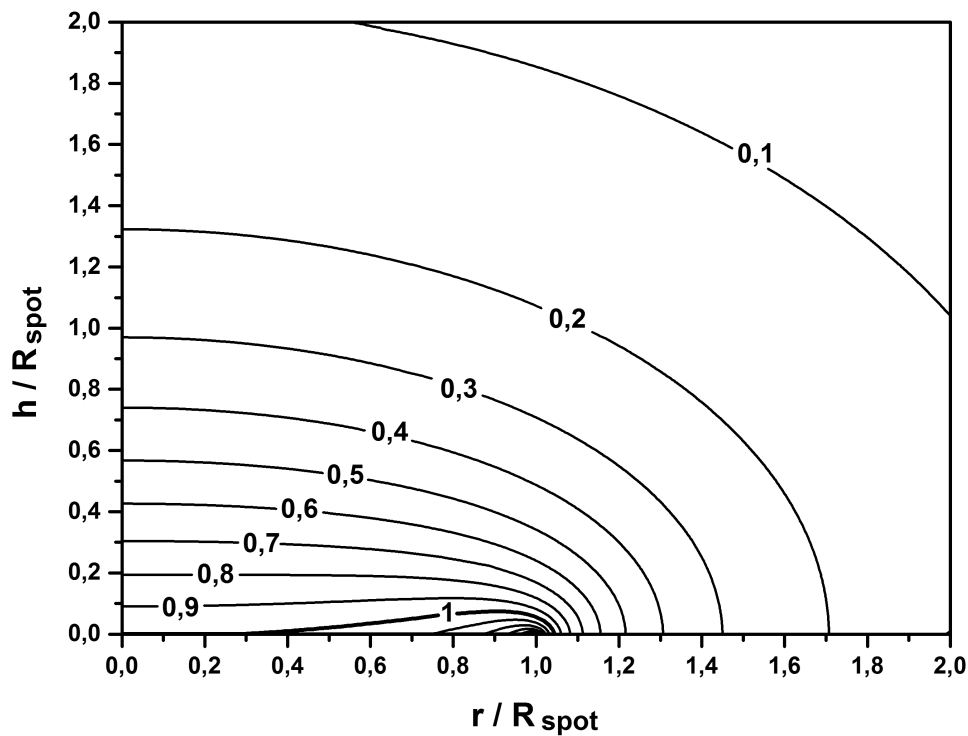
Расчет по формулам, приведенным на рис. 4, действительно дает на малых высотах для соленоида (рис. 5, верхняя пунктирная кривая –  $S_\infty$ ) значительно более медленное убывание магнитного поля с высотой по сравнению с моделью диполя (рис. 5, нижняя сплошная кривая –  $D_0$ ). Однако при этом и на больших высотах магнитное поле соленоида оказывается значительно большим, чем у диполя, что противоречит наблюдаемым спектрам пятен.

Результаты количественного сопоставления дипольной модели КМП с моделью соленоида и результатами радионаблюдений демонстрируют недостатки и ограниченность области применимости каждой из моделей: дипольная модель лучше работает на больших высотах, соленоидная – на малых, но друг с другом они нигде, кроме центра источника, не пересекаются.

Рассмотренные модели могут быть несколько приближены друг к другу путем введения в рассмотрение дополнительных параметров, прежде всего – конечного размера источника поля вглубь, под фотосферу (изначально рассматривался точечный диполь и бесконечно длинный соленоид). На рис. 5 представлены нижние и верхние огибающие семейства зависимостей для диполей (кривые  $D_0$  и  $D_\infty$ ) и соленоидов (кривые  $S_0$  и  $S_\infty$ ). Верхняя граница диполя всегда находилась на глубине  $z_{dip}$ , глубина погружения соленоида была произвольная, начиная от фотосферы. В рамках рассмотренных моделей наблюдается пересечение дипольных и соленоидных моделей, к сожалению, только



**Рис. 5.** Убывание магнитного поля с высотой в центре источника для различных вариантов дипольного (сплошные линии – D) и соленоидного (пунктирные линии – S) магнитных полей. Величина магнитного поля нормируется к его значению на фотосфере, а высоты над фотосферой – к глубине погружения диполя ( $z - dip = R_{spot}/1.088$ )



**Рис. 6.** Высотное распределение нормированных к магнитному полю на фотосфере ( $H_{spot}$ ) изогаусс с шагом  $0.1 * H_{spot}$  в модели полубесконечного кругового соленоида. Подповерхностный ток расположен на границе пятна

на достаточно больших высотах и со значительным усилением поля по сравнению со стандартной дипольной моделью.

Кроме оценки ограничений на высотное распределение МП, радионаблюдения позволяют также произвести сопоставление измеряемых размеров ИЦИ с модельными, когда ИЦИ представляется в виде геометрически тонкой излучающей поверхности, совпадающей с соответствующим гируровнем (3-м для е-моды). Для циклотронного механизма излучения измеряемый размер радиоизображения определяется как высотным распределением физических параметров над пятном (элек-

тронная температура, плотность плазмы), так и в большей степени геометрической формой распределения МП и, в особенности, местом входа соответствующего гироуровня (уровня постоянной величины модуля МП) в низкие, холодные слои атмосферы Солнца.

Поведение изогаусс дипольного поля, использованное для интерпретации реальных наблюдений, хорошо видно на рис. 3. Оно характеризуется пологим падением с углами входа в холодные слои  $\sim 45^\circ$  и равномерным расширением при уменьшении величины МП. В соленоидных моделях изогауссы показывают совершенно иное поведение (см. рис. 6). В пределах пятна МП изменяется медленно, а за областью расположения поверхности с током изогауссы резко поворачивают вниз и входят в холодные слои практически вертикально. Размеры источника при этом вначале изменяются мало и лишь при сильном уменьшении МП начинают увеличиваться, но медленнее, чем для дипольных моделей.

Таким образом, видно, что в коротковолновой части спектра соленоидное МП лучше соответствует результатам наблюдений. Это дает основание в качестве альтернативного варианта для адекватной интерпретации наблюдений рекомендовать использование синтетической модели – линейной комбинации магнитных полей диполя и соленоида.

В заключение хочется отметить, что, учитывая характер распределения физических параметров атмосферы над солнечными пятнами – главное, быстрый (почти ступенчатый) рост температуры при переходе от хромосферы к короне – можно а priori предположить, что КМП нельзя представлять в виде единой модели. Действительно, где-то должна существовать граница, на которой меняется соотношение газовое давление/магнитное давление. Можно ожидать, что на этой границе должны наблюдаться скачкообразные изменения характеристик ИЦИ. И одно из них действительно удалось зарегистрировать (Топчило и др., 2010) как резкое изменение изображения ИЦИ в о-моду излучения в диапазоне 2.3–2.7 см – оно соответствует КМП напряженностью 2.0–2.3 КГс, располагавшемуся на высоте 4–6 тыс. км над уровнем фотосферы.

#### 4 Основные результаты

Используя материалы наблюдений Солнца на микроволнах и преимущества исследований КМП с применением методов, развитых в этом диапазоне, изучалась переходная область хромосфера-корона над главным пятном активной области NOAA 11140 (январь 2011 г.). Получены следующие результаты:

1. На основе наблюдений с высоким пространственным разрешением  $\sim 1''$  (Финкельштейн и др., 2012), произведено сопоставление измеренных размеров ИЦИ и его высоты над уровнем фотосферы с моделью ИЦИ, базирующейся на дипольной модели МП.
2. Выявлено, что в диапазоне (3.5–13) см результаты наблюдений удовлетворительно соответствуют дипольной модели ИЦИ, но на более коротких волнах  $\sim 2$  см (ПАТАН-600, NoRH) вступают с ними в резкое противоречие.
3. Указано, что для устранения этого противоречия необходимо, чтобы МП в области нижней короны спадало медленнее, чем это допускает дипольная модель МП.
4. Для построения адекватной модели КМП рассчитана модель соленоида и сопоставлена с моделью диполя. Определены пределы применимости обеих моделей.
5. Для интерпретации результатов наблюдений переходной области хромосфера-корона над солнечными пятнами предлагается использовать комплексную модель МП – линейную комбинацию соленоида (на коротких волнах) и диполя (длинные волны). Граница между ними предположительно находится на высоте  $\sim 5$  тыс. км над уровнем фотосферы в области МП напряженностью  $\sim 2$  КГс.

## Литература

- Богод В.М., Алесин А.М., Перваков А.А. // *Астрофиз. Бюлл.* 2011. Т. 66. № 2. С. 223.
- Железняков В.В. // *Астрон. журн.* 1962. Т. 39. С. 5.
- Железняков В.В. // *Астрон. журн.* 1963. Т. 40. С. 829.
- Железняков В.В. // *Радиоизлучение Солнца и планет.* М.: Наука. 1964.
- Злотник Е.Я. // *Астрон. журн.* 1968. Т. 45. № 2. С. 310.
- Коржавин и др. (Korzhavin A.N., Oreikina L.V., Peterova N.G.) // *Astroph. Bull.* 2010. V. 65. N. 1. P. 60.
- Коржавин и др. (Korzhavin A.N., Topchilo N.A., Peterova N.G.) // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2012. V. 52. N. 7. P. 867.
- Топчило и др. (Topchilo N.A., Peterova N.G., Borisevich T.P.) // *Astron. Rep.* 2010. V. 54. N. 1. P. 69.
- Финкельштейн А.М., Рахимов И.А., Дьяков А.А., Коржавин А.Н., Топчило Н.А., Свешников М.Л., Петерова Н.Г. // *Труды ИПА РАН.* 2012. В. 25. С. 154.